第十五章

量 子 物 理

主要内容：

黑体辐射　斯特藩 - 玻耳兹曼定律　$M(T)=\sigma T^4$

维恩位移定律　$\lambda_{\mathrm{m}} T = b$

普朗克量子假设　$\varepsilon = nh\nu$

光子方程
$$\begin{cases} E = h\nu \\ p = \dfrac{h}{\lambda} \end{cases}$$

康普顿效应

能量守恒　$h\nu_0 + m_0 c^2 = h\nu + mc^2$

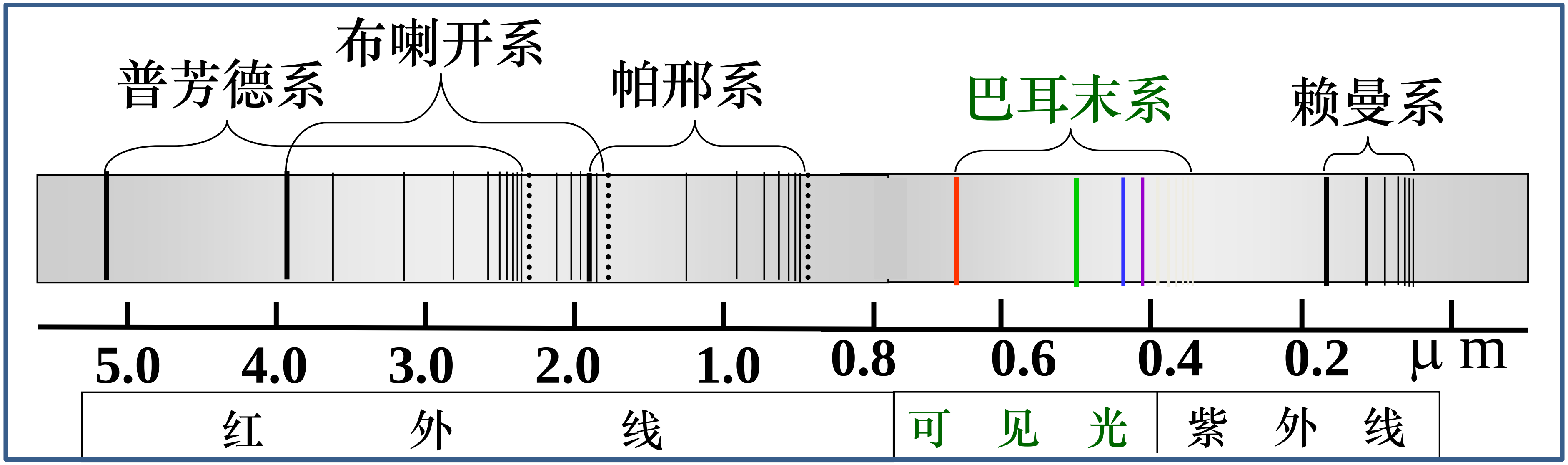
动量守恒　$\dfrac{h\nu_0}{c}\vec{e}_0 = \dfrac{h\nu}{c}\vec{e} + m\vec{v}$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta) = 2\lambda_{\mathrm{C}} \sin^2\frac{\theta}{2}$$

§15-4 氢原子的玻尔理论

1. 近代氢原子观的回顾

1) 氢原子光谱的实验规律



实验规律：

波数 $$\sigma = \frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$n_f = 1,2,3,\cdots, \qquad n_i = n_f + 1, n_f + 2, n_f + 3, \cdots$$

里德伯常数 $R = 1.097 \times 10^{7}\ \mathrm{m}^{-1}$

谱线特点：

非连续性

稳定性

规律性

2) 卢瑟福的原子有核模型

- 1897年， J.J.汤姆孙发现电子.
- 1903年，汤姆孙提出原子的“葡萄干蛋糕模型”.

原子中的正电荷和原子的质量均匀地分布在半径为 10^{-10}m 的球体范围内，电子浸于其中.

- 卢瑟福的原子**有核模型**（行星模型）

原子的中心有一带正电的原子核，它几乎集中了原子的全部质量，电子围绕这个核旋转，核的尺寸与整个原子相比是很小的.

卢瑟福

（1871 —1937）

2. 氢原子的玻尔理论

1913年玻尔在卢瑟福的原子结构模型的基础上，将量子化概念应用于原子系统，提出三条假设：

玻 尔 （Niels Bohr)
(1885—1962）

(1) 定态假设

(2) 频率条件

(3) 量子化条件

1922年玻尔获诺贝尔物理学奖.

1) 玻尔的氢原子理论的三个重要假设

定态假设　　量子化条件假设　　频率条件假设

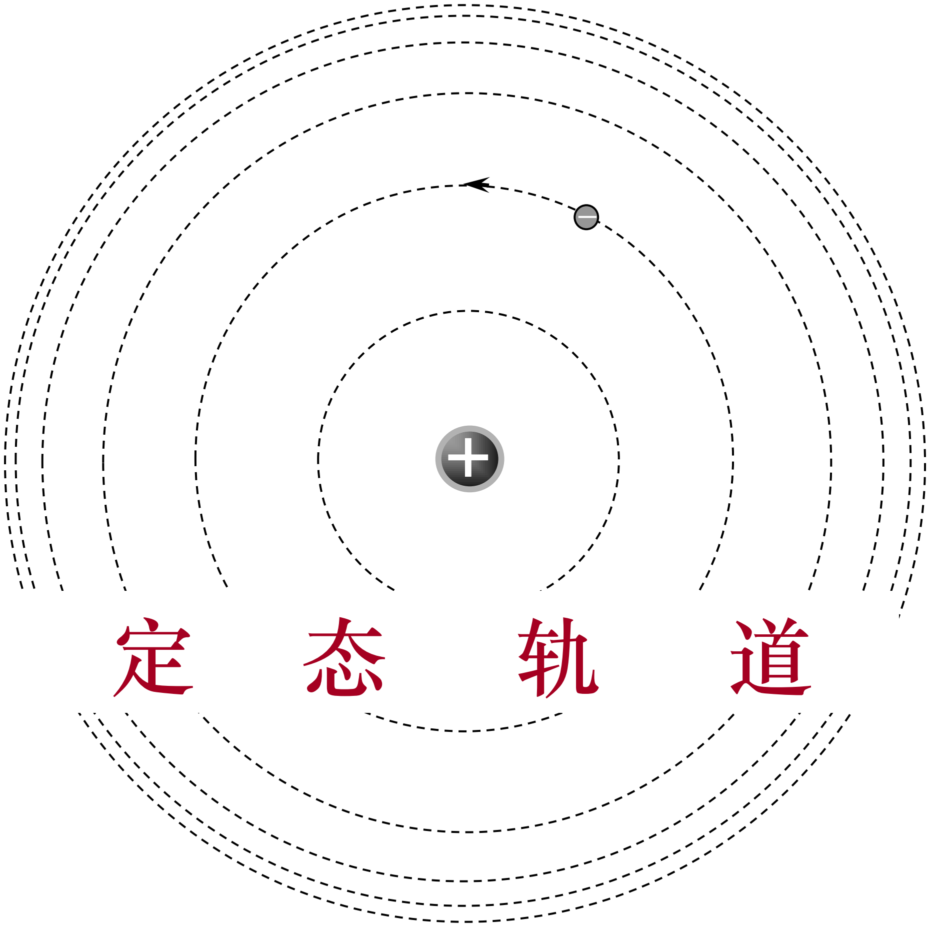
(1) 定态假设

原子中的电子只能在一些半径不连续的轨道上作圆周运动。

在这些轨道上运动的电子不辐射电磁波，原子处于稳定状态，称为定态，并具有一定的能量。

相应的轨道称为

定态轨道



1) 玻尔的氢原子理论的三个重要假设

定态假设　　量子化条件假设　　频率条件假设

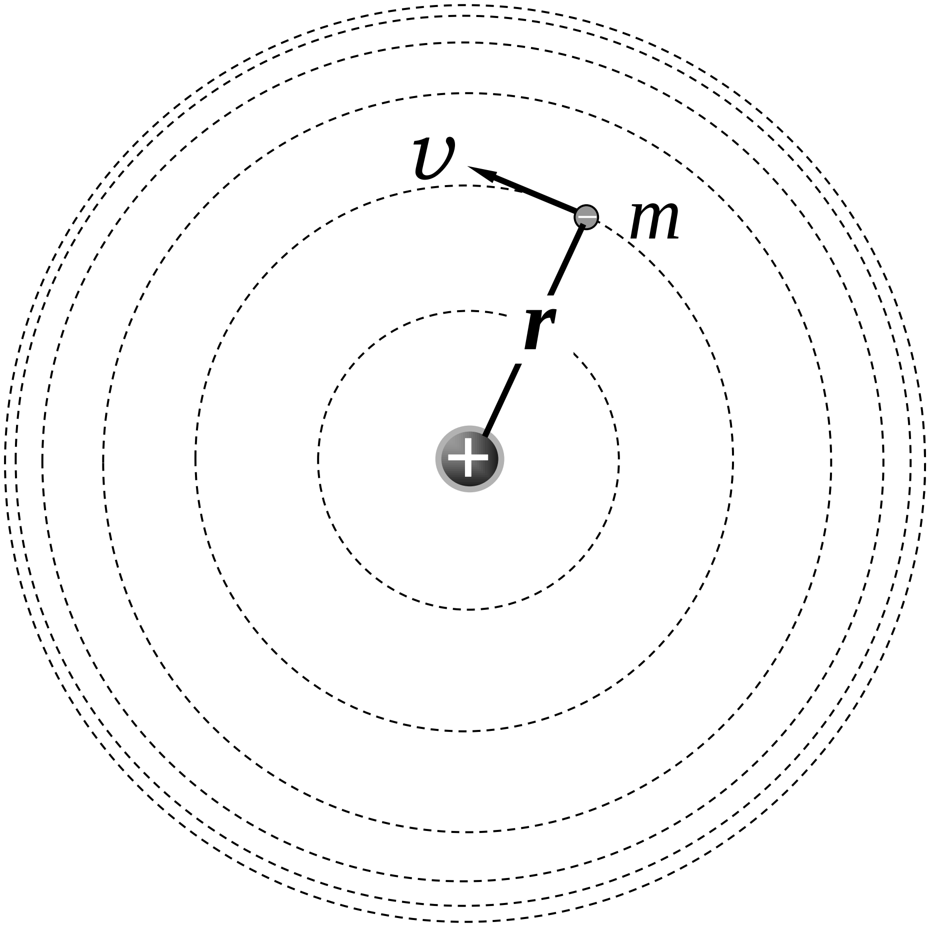
（2）量子化条件假设

在定态轨道上运动的电子，其角动量只能取 **h/(2π)** 的整数倍，即

$$L = mvr = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

称为 角动量量子化条件

n = 1,2,3,··· 为主量子数



1) 玻尔的氢原子理论的三个重要假设

定态假设　　量子化条件假设　　频率条件假设

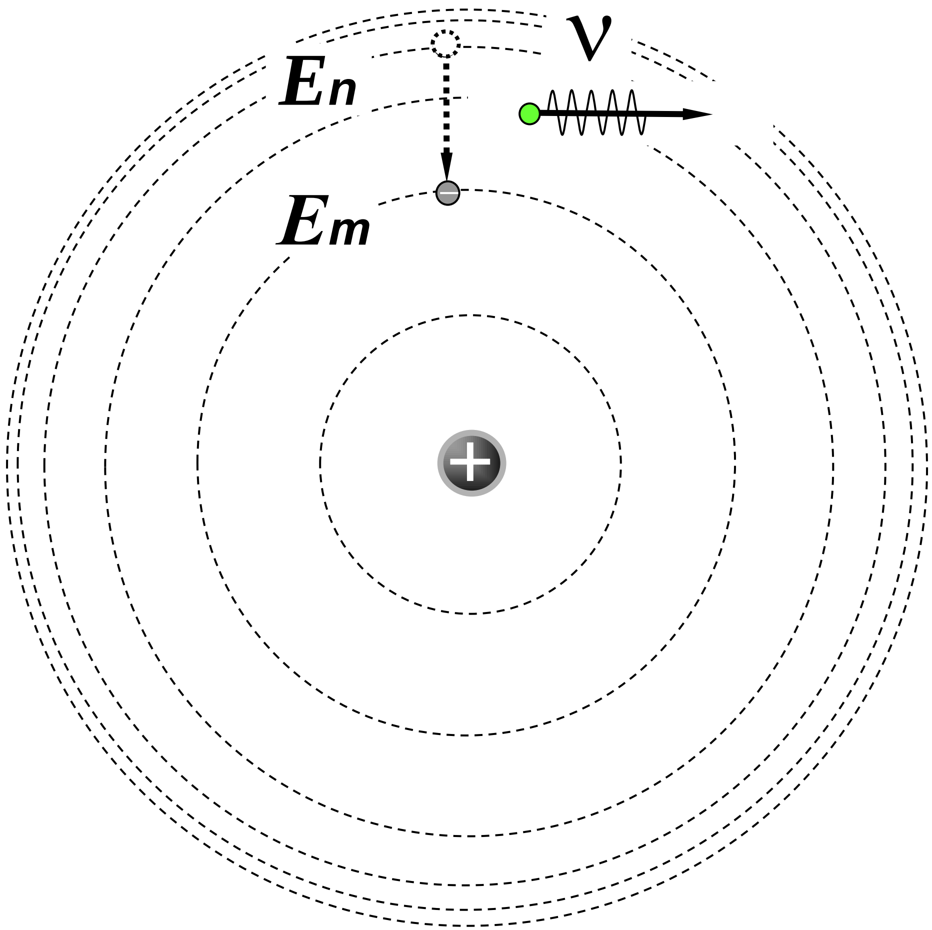
(3) 频率条件假设

电子从某一定态向另一定态跃迁时将发射（或吸收）光子。

若初态和终态的能量分别为 E_i 和 E_f 且 $E_i > E_f$ 则发射光子频率满足

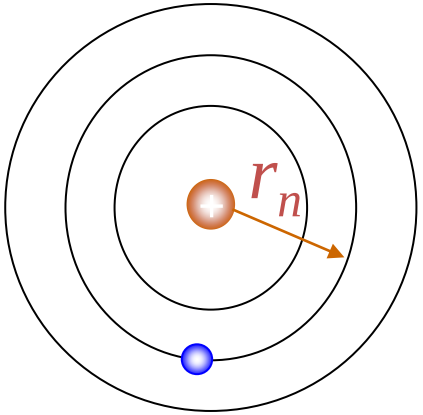
$$h\nu = E_i - E_f$$

称为 玻尔的频率条件



2) 氢原子轨道半径和能量的计算

(1) 轨道半径



$$
\begin{cases}
\text{量子化条件：} & m v_n r_n = n \dfrac{h}{2\pi} \\[2ex]
\text{经典力学：} & \dfrac{e^2}{4\pi\,\varepsilon_0 r_n^2} = m \dfrac{v_n^2}{r_n}
\end{cases}
$$

$$\boxed{r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 = a_0 n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \cdots)}$$

$n = 1$，玻尔半径 $r_1 = a_0 = \dfrac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.529 \times 10^{-10}\ \mathrm{m}$

（2）能量

第 *n* 轨道电子总能量： $E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\ \varepsilon_0 r_n}$

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{E_1}{n^2}$$

基态能量 $(n = 1)$

$$E_1 = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} = -13.6\,\mathrm{eV}$$ （电离能）

激发态能量 $(n > 1)$ $E_n = \frac{E_1}{n^2}$

3） 玻尔理论对氢原子光谱的解释

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

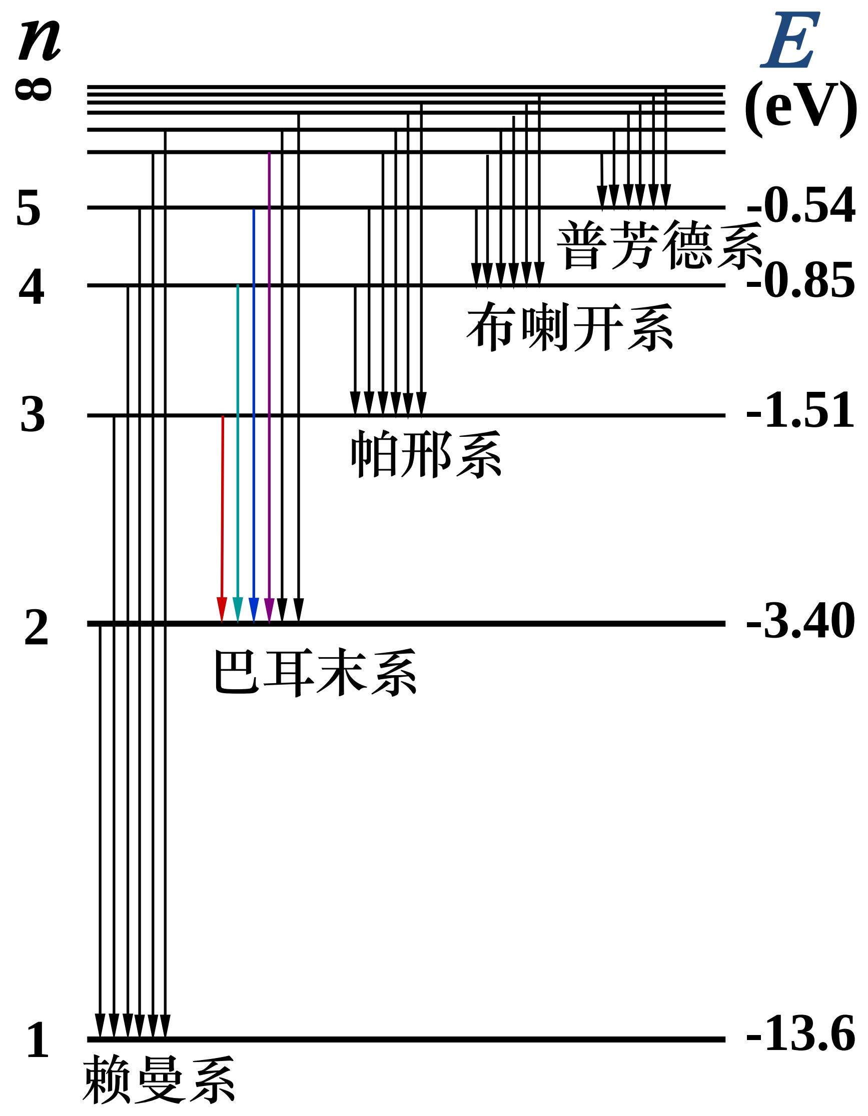
$$h\nu = E_i - E_f \qquad (n_i > n_f)$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

$$= \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1.097 \times 10^7 \,\mathrm{m}^{-1}$$

$\approx R$（里德伯常数）



氢原子的能级跃迁及谱线系

3. 氢原子玻尔理论的意义和困难

1） 意义

（1） 成功解释了原子的稳定性、氢原子及类氢离子光谱规律.

（2） 首先提出了原子能量量子化的概念和角动量量子化的概念.

（3） 创造性的提出了定态、跃迁等重要概念，为近代物理的研究奠定了基础.

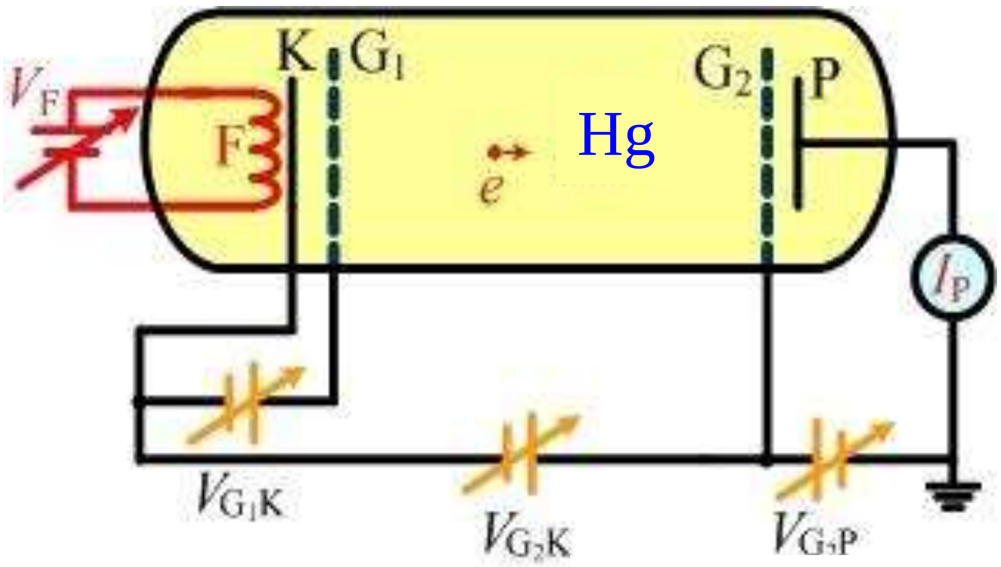
2） 困难

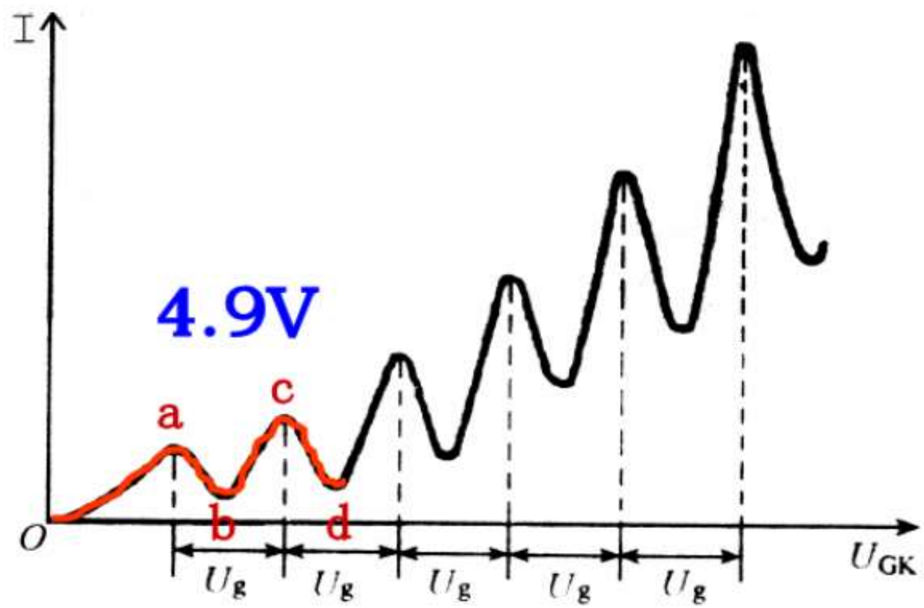
(1) 不适用于比氢原子更复杂的原子.

(2) 不能解释谱线的强度、宽度等问题.

(3) 半经典半量子理论, 保留了经典轨道的概念，又赋予它们量子化的特征，不能解释稍微复杂的问题.

§15-5 弗兰克-赫兹实验





实验证实了原子分立能级的存在

弗兰克和赫兹获得了1925年诺贝尔物理学奖.

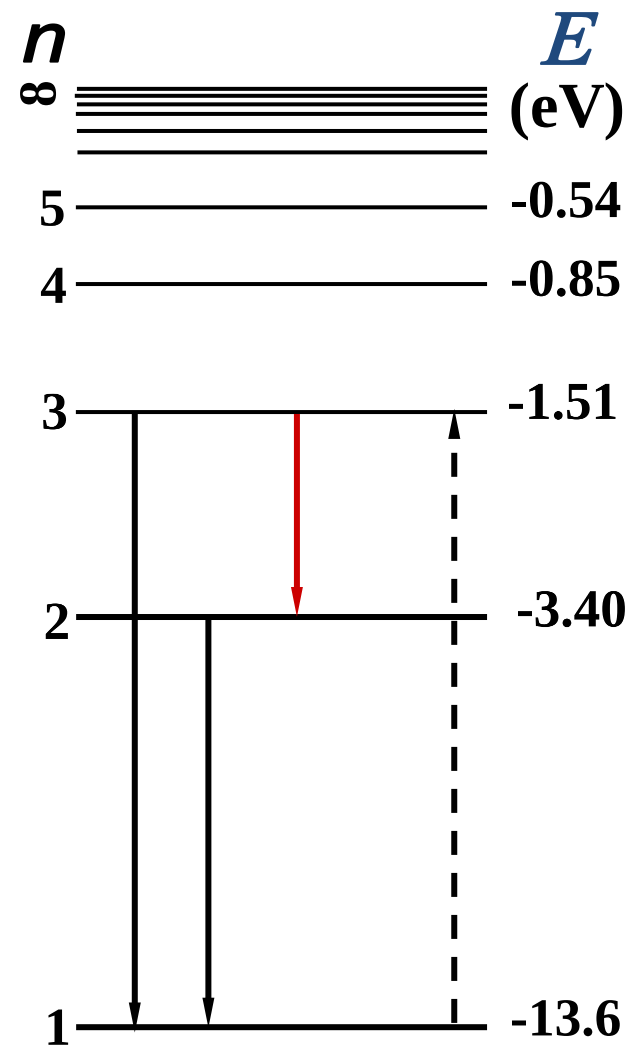
例1 已知：氢原子受到能量为E = 12.2eV 的电子轰击

求：氢原子可能辐射的谱线波长

解

$$E = E_n - E_1 = E_1(\frac{1}{n^2} - 1)$$

$$n \approx 3.1$$



原子可激发至n=2,3能级

可能发生的跃迁：3→2, 3→1, 2→1

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} = R(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2})$$

λ_{32} = 6.563×10^{-7} (m)

λ_{21} = 1.215×10^{-7} (m)

λ_{31} = 1.026×10^{-7} (m)

§15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

1924年德布罗意在他的博士论文《关于量子理论的研究》中提出一切物质都具有波粒二象性的论述，并建议用电子在晶体上做衍射实验来验证。爱因斯坦誉之为“揭开一幅大幕的一角”.

德布罗意
（1892 —1987）

德布罗意为此获得**1929**年诺贝尔物理学奖。

1. 德布罗意假设　　实物粒子具有波粒二象性

- 德布罗意公式 $\lambda = \dfrac{h}{p}$　　$\nu = \dfrac{E}{h}$

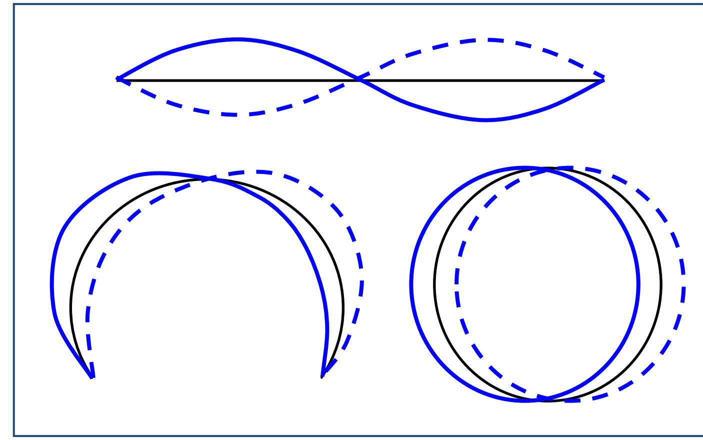
这种波称为德布罗意波或物质波

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad \nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

(1) 若 $v << c$ 则 $m = m_0$　　若 $v \to c$ 则 $m = \gamma m_0$

(2) 宏观物体的德布罗意波长小到实验难以测量的程度，因此宏观物体仅表现出粒子性.

例1 从德布罗意波导出氢原子玻尔理论中角动量量子化条件.



解 两端固定的弦，若其长度等于波长则可形成稳定的驻波.

将弦弯曲成圆时 $2\pi r = n\lambda \qquad n = 1,2,3,4,\cdots$

电子绕核运动其德布罗意波长为 $\lambda = \dfrac{h}{mv}$

$$2\pi rmv = nh$$

角动量量子化条件 $L = mvr = n\dfrac{h}{2\pi}$

例2 一束电子中，电子的动能 200eV，求此电子的德布罗意波长 .

解 $v << c$, $E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$ $\quad v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_0}}$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 200 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}}} \mathrm{m \cdot s^{-1}} = 8.4 \times 10^{6}\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

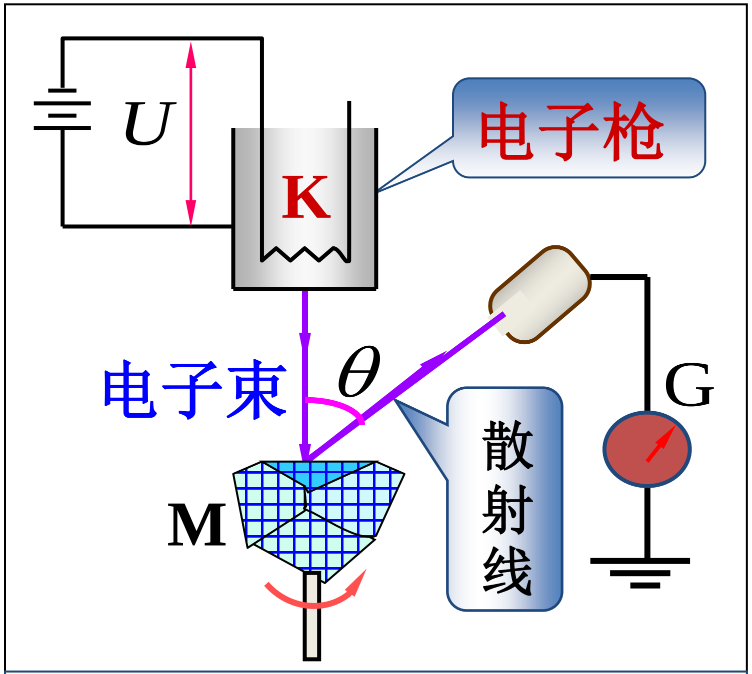
$$\because v << c \qquad \therefore \lambda = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{9.1 \times 10^{-31} \times 8.4 \times 10^{6}}\ \mathrm{nm}$$

$$\lambda = 8.67 \times 10^{-2}\ \mathrm{nm}$$

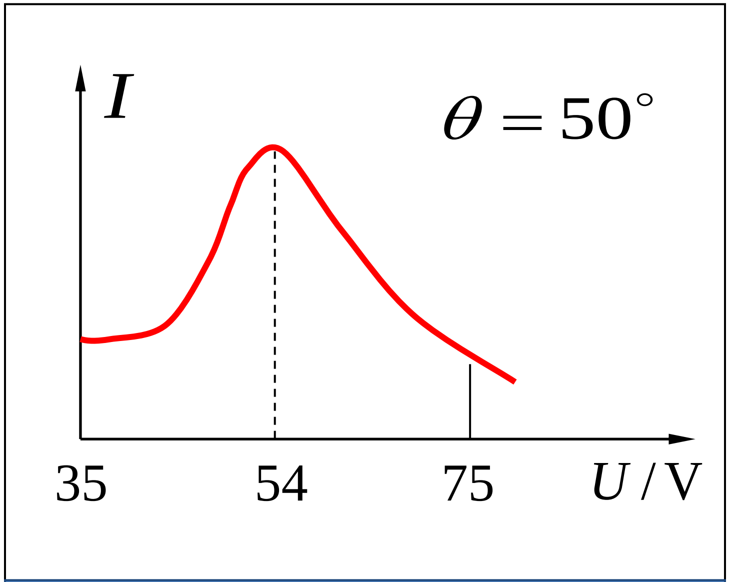
此波长的数量级与 X 射线波长的数量级相当.

2. 德布罗意波的实验验证

1）戴维孙 - 革末电子衍射实验（1927年）



电子被镍晶体衍射实验

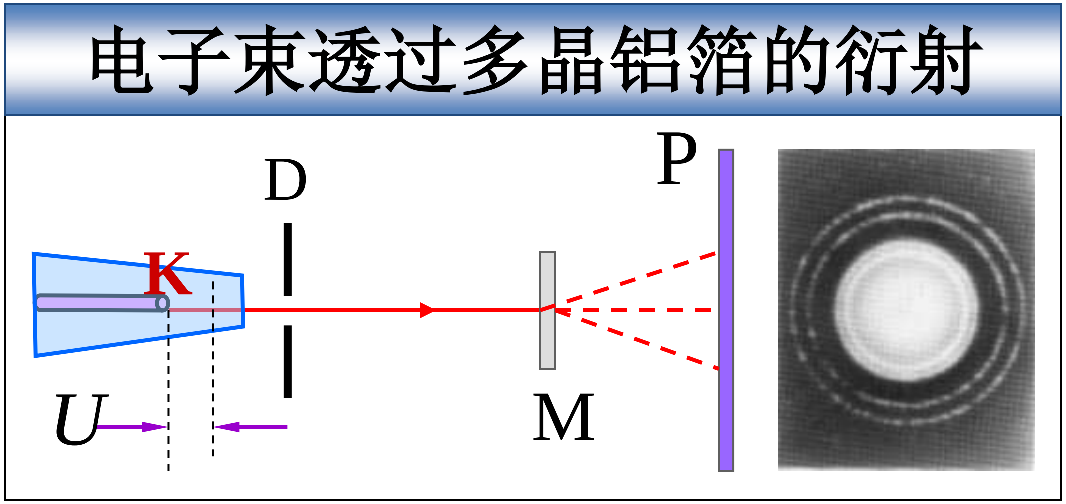


当散射角 $\theta = 50^\circ$ 时电流与加速电压曲线

电子束在单晶晶体上反射的实验结果符合X射线衍射中的布拉格公式.

2) G . P . 汤姆孙电子衍射实验（1927年）

电子束穿越多晶薄片时出现类似X射线在多晶上衍射的图样.

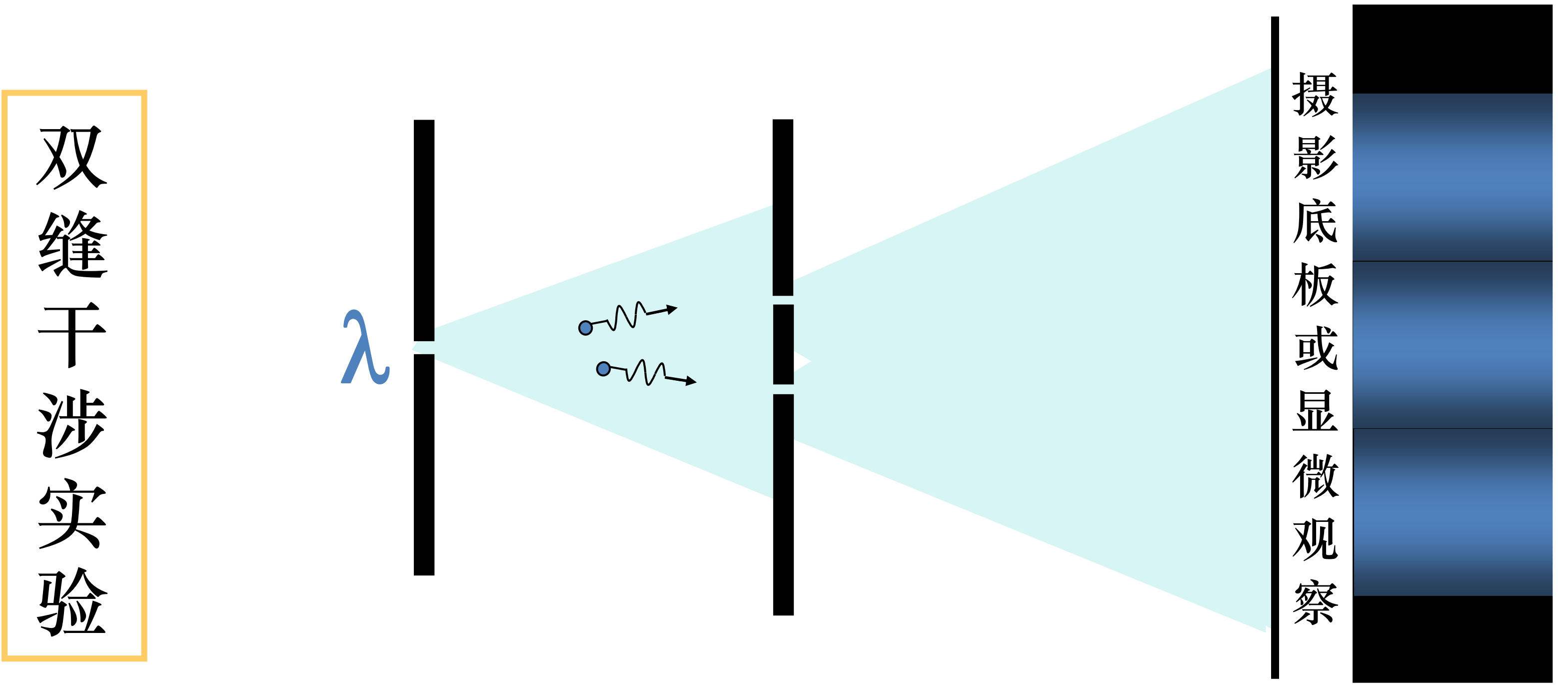


戴维孙和G.P.汤姆孙共同获得1937年诺贝尔物理学奖.

3 德布罗意波的统计解释

1926 年玻恩提出，德布罗意波为**概率波.**

在某处德布罗意波的强度与粒子在该处附近出现的概率成正比 .



光子的行为不能用经典粒子的运动状态参量描述和准确预测；光波在空间某处的强度反映了光子在该处附近出现的概率。

今日作业：15-18；15-19；15-22；15-25

15-18 在玻尔氢原子理论中，当电子由量子数n_i＝5的轨道跃迁到n_f＝2的轨道上时，对外辐射光的波长为多少？若再将该电子从n_f＝2的轨道跃迁到游离状态，外界需要提供多少能量？

15-19 若用能量为12.6eV的电子轰击氢原子，将产生哪些谱线？

15-22 求动能为 1.0 eV 的电子的德布罗意波的波长.

15-25 若电子和光子的波长均为0.20 nm，则它们的动量和动能各为多少？